

УДК 62-83 : 621.3

## **МНОГОФАЗНЫЙ ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В АВТОНОМНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

**Липунова С.Ю.****научный руководитель д-р техн. наук Бронов С. А.*****Сибирский федеральный университет***

Индукторные электроприводы двойного питания (ИЭПДП) строятся на базе индукторных двигателей двойного питания (ИДДП), у которых на статоре размещаются две многофазные обмотки переменного тока. Благодаря сочетанию принципов электромагнитной редукции и двойного питания, ИДДП обладают рядом преимуществ перед другими двигателями.

За счёт принципа электромагнитной редукции, реализуемого с помощью явно выраженной зубчатости ротора и статора, электромагнитный момент двигателя увеличивается в десятки раз, а за счёт принципа двойного питания, реализуемого размещением на статоре двух многофазных обмоток, питаемых переменным током, обеспечивается равномерное вращение с как угодно малыми скоростями ротора при сравнительно высоких частотах питания.

В целом это позволяет перейти к так называемым безредукторным электроприводам, в которых механический редуктор отсутствует. В результате значительно уменьшаются или полностью исчезают все погрешности, вносимые редуктором (в том числе и в процессе его износа), а также повышается надёжность электропривода из-за исчезновения большого числа вращающихся и трущихся механических частей.

Недостатком ИДДП являются более низкие показатели использования массы и объема, что обусловлено наличием второй обмотки в тех же пазах статора. Уменьшение массы и габаритов может быть достигнуто только после исследования возможности оптимизации конструкции ИДДП (в результате моделирования).

В настоящее время теория электропривода (ЭП) с ИДДП недостаточно развита и требует дополнительных исследований. ИДДП и электроприводы на их основе разрабатывались и исследовались в 1980-е годы, но затем интерес к ним заметно убавился. В то же время, широкое распространение получили родственные им индукторные шаговые двигатели и вентильные индукторные двигатели (в которых использован принцип электромагнитной редукции без принципа двойного питания). Это означает, что класс двигателей с электромагнитной редукцией находит всё более широкое применение в области малоомощного исполнительного электропривода. В этой связи представляет интерес продолжение исследований электроприводов с индукторными двигателями различных типов, в том числе, двойного питания.

В настоящее время в научно-учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования (НУЛ САПР) Института космических и информационных технологий (ИКИТ) Сибирского федерального университета (СФУ) ведутся работы по созданию автоматизированного рабочего места (АРМ) электромеханика, в рамках которого реализуются методология и технология проектирования индукторных электроприводов двойного питания.

Обычно ИДДП проектируют в двумя обмотками на статоре с одинаковым числом фаз — двухфазные или трёхфазные. Отдельный интерес представляет возможность исполнения ИДДП в многофазном варианте — с числом фаз, большим трёх.

Увеличение числа фаз приводит к ряду положительных качеств: уменьшается нагрузка на один силовой ключ инвертора (в частности, уменьшается вероятность выхода его из строя, уменьшаются габариты радиатора или он вообще оказывается не

нужен в маломощных электроприводах); увеличивается равномерность вращения ротора при импульсной форме питающего напряжения; сохраняется работоспособность при обрыве одной фазы; появляется возможность симметрирования двигателя при обрыве одной фазы за счёт принудительного отключения других фаз.

Все эти свойства многофазных электроприводов хорошо известны применительно к асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. Но для ИДДП характерно большее многообразие вариантов многофазного исполнения и, соответственно, дополнительных функциональных возможностей.

Как правило, многофазные асинхронные двигатели исполняются в короткозамкнутом исполнении, так как это позволяет делать многофазной только одну (статорную) обмотку. Число фаз в короткозамкнутой роторной обмотке автоматически формируется таким же, как и в статорной, поэтому переделывать можно только статорную обмотку. В связи с этим характерной чертой многофазных асинхронных двигателей является одинаковое число фаз статора и ротора (часто по разным соображениям используется 9 фаз).

У ИДДП можно намотать две статорные обмотки с разным числом фаз. Это даёт ряд дополнительных возможностей. Например, одну обмотку можно сделать сравнительно маломощной, с небольшим числом фаз (две или три) и уменьшить токовую нагрузку на соответствующие инверторы. А вторую обмотку сделать более мощной и многофазной, тогда использование многих фаз также даст уменьшение установленной мощности каждого ключа инвертора.

Проектирование электроприводов с многофазными ИДДП предполагает наличие соответствующих математических моделей. Существующие методики получения математического описания электрических машин хорошо проработаны и могут использоваться для этих целей. Но они предназначены, как правило, для ручного вывода. При этом для упрощения выкладок заранее делается большое число допущений, которые не всегда справедливы. Например, широко распространено допущение о симметрии (электрической и геометрической) обмоток. Это существенно упрощает аналитические ручные выкладки. Но в реальности может оказаться необходимо учесть тот или иной вид несимметрии, например, при анализе процессов в прецизионных ЭП, в которых погрешности по углу поворота составляют доли градусов. Ввиду громоздкости и большого объёма преобразований многие модели до сих пор не получены, особенно для многофазных электрических машин (тем более, при обмотках с разным числом фаз).

Общая математическая теория электрических машин включает много вариантов математических моделей для разных задач проектирования. Эти модели составляют комплекс моделей, так как они взаимосвязаны и получают последовательным преобразованием математического описания по определённым правилам с введением ряда допущений.

Для автоматизации проектирования электромеханических систем используются автоматизированные рабочие места (АРМ).

Составной частью АРМ электромеханика является комплекс программ для автоматизированного получения математических моделей ИДДП.

В зависимости от целей проектирования, разного состава переменных состояния и входных переменных, при различных допущениях применяются различные математические модели электродвигателей, которые, как правило, получают вручную и только для отдельных режимов работы, что затрудняет их последующее использование для других режимов работы.

В то же время, процесс получения математических моделей можно значительно упростить и сделать более универсальным, если использовать такие математические

программы, как Maple, MathCAD, Matlab и Mathematica. Данные программы позволяют выполнять не только численные расчёты, но также символьные операции компьютерной алгебры. Поэтому их можно использовать не только для расчётов по готовым математическим моделям, но и для получения самих моделей в символьном виде. Математические программы имеют сравнительно небольшое число символьных операций, но их комбинирование позволяет решать многие практические задачи, в том числе, по разработке математических моделей электродвигателей. Математическая теория электрических машин сама по себе является хорошо структурированной методикой получения математических моделей различного вида, что способствует её алгоритмизации и программной реализации.

При использовании данных математических программ можно получить математические модели, учитывающие различные особенности ИДДП: электрическую и геометрическую симметрию, синусоидальность зависимостей индуктивностей от угла поворота ротора, насыщение магнитных цепей и др.

В настоящее время в НУЛ САПР разработана унифицированная методика получения математических моделей в символьной форме, включая оригинальные библиотеки символьных процедур, а также разработана и программно реализована автоматизированная методика параметрической идентификации моделей.

Можно выделить следующие составляющие комплекса программ, которые автоматизировано (с высокой степенью автоматизации) получаются:

1 исходное математическое описание ИДДП в виде системы уравнений электрического и механического равновесия с заданным числом фаз каждой обмотки в естественной (раздельной) системе координат обмоток в физических единицах измерения;

2 математическая модель ИДДП с токами и потокоцеплениями в качестве переменных состояния (алгебро-дифференциальная модель);

3 математическая модель ИДДП с потокоцеплениями в качестве переменных состояния (система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши);

4 математическая модель ИДДП с токами в качестве переменных состояния (система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши);

5 математическая модель ИДДП с использованием в качестве переменных состояния токов первой обмотки и потокоцеплений второй обмотки (система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши);

6 математическая модель ИДДП с использованием в качестве переменных состояния потокоцеплений первой обмотки и токов второй обмотки (система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши);

7 математическая модель ИДДП при учёте геометрической симметрии (расположение обмоток со сдвигом на заданный угол) и косинусоидальной аппроксимацией взаимных индуктивностей обмоток (для всех перечисленных в пп.1...6 вариантов);

8 математическая модель ИДДП при учёте электрической симметрии (равенство активных сопротивлений и индуктивностей фаз соответствующих обмоток) для варианта в п. 7;

9 математическая модель ИДДП при преобразовании числа фаз (обе обмотки преобразуются к одинаковому числу фаз или к разному) для варианта в п.9;

10 математическая модель ИДДП при преобразовании к заданному способу соединения обмоток и подключения их к источнику питания (звезда, треугольник) при одинаковом соединении обеих обмоток и при различном виде соединения каждой обмотки;

11 математическая модель, преобразованная к единой системе координат обмоток (с общепринятым числом фаз каждой преобразованной обмотки 2, с любым другим указанным числом фаз) — для моделей с электрической и геометрической симметрией;

12 выбор конкретного варианта единой системы координат обмоток;

13 линеаризация математической модели ИДДП для единой системы координат обмоток при условии электрической и геометрической симметрии;

14 выделение системы алгебраических уравнений для установившегося режима;

15 решение уравнений для установившегося режима (определение переменных состояния в зависимости от параметров управления и нагрузки);

16 упрощение выражений переменных состояния для установившегося режима с учётом различных факторов — реального соотношения параметров двигателя и режима, задач исследования, особенностей рассматриваемого процесса;

17 выделение системы дифференциальных уравнений для приращений с целью исследования переходных режимов в малых отклонениях;

18 преобразование системы дифференциальных уравнений для приращений в матричную форму;

19 применение преобразования Лапласа к системе дифференциальных уравнений для приращений в матричной форме, переход к классическому представлению в виде матричной системы уравнений состояния;

20 получение матричной передаточной функции ИДДП;

21 построение структурной схемы ИДДП с использованием аппарата передаточных функций;

22 преобразование структурной схемы ИДДП на основе аппарата передаточных функций применительно к конкретному использованию в различных системах электропривода;

23 расчёт числовых параметров передаточных функций для всех режимов работы, выделение типовых динамических звеньев;

24 расчёт частотных характеристик по полученным передаточным функциям с выделением схожих звеньев в числителях и знаменателях передаточных функций с оценкой возможности их дальнейшего упрощения;

25 упрощение передаточных функций с учётом реального соотношения их параметров, связанных с параметрами двигателя и режима;

26 аналитические выкладки для передаточных функций в общем виде с получением аналитических зависимостей параметров типовых динамических звеньев от параметров двигателя и режима работы;

27 последовательное преобразование передаточных функций в аналитическом виде с целью их упрощения и использования в последующем при проектировании замкнутых систем электропривода;

28 автоматическое формирование математических моделей замкнутых систем электроприводов на основе полученных выше математических моделей ИДДП и математических моделей других элементов электроприводов.

Многие указанные варианты моделей имеют дополнительные разветвления, и общее количество моделей комплекса может составлять сотни частных моделей. Получить это вручную невозможно.

В настоящее время созданы программы для автоматизированного получения части перечисленных математических моделей нескольких типов двигателей в MathCAD, Matlab и Maple для различных режимов работы, в различных системах координат в численной и символьной форме.

В перспективе предполагается автоматически получать модели и для аварийных режимов работы (обрыва или закорачивания фаз).